

초음속 유동장 내 플라즈마 토치를 사용한 강제 점화 특성

김채형* · 정인석*[†] · 최병일** · 토시노리 코오치** · 고로 마쓰야**

Forced Ignition Characteristics with a Plasma Jet Torch in Supersonic Flow

Chae-Hyoung Kim* · In-seuk Jeung*[†] · Byoungil Choi** · Toshinori Kouchi** · Goro Masuya**

ABSTRACT

Mixing and combustion experiments with a vent slot mixer were performed in Mach 2 supersonic wind tunnel. Helium and hydrogen gases each were used for the mixing and the combustion experiment with a plasma jet (PJ) torch. The vent slot mixer holds plenty of fuel in the downstream mixing region, even though the fuel is transversely injected. In case of the combustion, the injected fuel is ignited by the PJ torch, and then unburned mixture is burned by shock-induced combustion downstream. Thermal choking in the combustor leads to shock trains in the isolator, causing the unstable combustion.

초 록

마하 2의 초음속 풍동 장치에서 벤트 혼합기를 사용하여 혼합·연소실험을 수행하였다. 혼합실험에서는 헬륨을 사용하였고, 연소실험에서는 수소와 플라즈마 토치를 사용하여 연소 특성을 연구하였다. 혼합실험에서는 벤트 혼합기에 의해 수직분사임에도 불구하고 후류 혼합층에 많은 연료가 잔존하였다. 연소 실험의 경우 낮은 온도의 초음속 유동에서 플라즈마 토치를 사용한 점화와 연소되지 않은 연료-공기 혼합물의 충격파 유도 연소가 후류 영역에서 발생하였다. 열질식이 일어난 경우, shock train이 발생하며 이는 연소기내 연소 불안정성을 유도한다.

Key Words: Vent Slot Mixer (벤트 혼합기), Plasma Jet Torch (플라즈마 제트 토치), Thermal Choking (열질식), Supersonic Combustion (초음속 연소)

1. 서 론

최근 비행시험에 성공한 미국의 X-51A는 마하

4.5에서부터 마하 6-6.5까지의 가속 가능성 여부에 주안점을 두었다[1]. 이와 같이 저속의 마하수부터 극초음속까지 비행할 수 있는 비행엔진을 이중모드 스크램제트 엔진이라 한다. 이 경우 저속의 마하수 (램제트 모드)에서는 유입 유동의 엔탈피가 분사된 연료의 자발 점화를 유도하기에는 높지 않다. 따라서 연료의 강제 점화를 위

* 서울대학교 항공우주공학과

** 일본 동북대학교 항공우주공학과

[†] 교신저자, E-mail: enjis@snu.ac.kr

해서 점화기가 필요하다. 또한 초음속 내부 유동 내에서 연료와 공기를 혼합시킬 수 있는 혼합기가 요구된다. 이에 대한 기초 연구로써 본 논문에서는 본 연구자가 개발한 벤트 혼합기를 사용하여 저온의 초음속 유동에서 플라즈마 토치를 사용한 강제 점화시의 화염 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법 및 실험 조건

Figure 1은 초음속 풍동 실험 장치를 나타낸다. 실험 장치의 전체 구성은 노즐, Isolator, 혼합기 모델, PJ토치, 연료 분사부, 압력 측정부로 구성되어 있다. 노즐은 마하 2의 반쪽 노즐을 사용하였다[2]. Isentropic 식에 의한 노즐 출구 조건은 정압력 12.8 kPa, 정온도 159 K, 질유량 0.13 kg/s 이다. 점화기는 물냉각 방식의 PJ 토치를 사용하였으며, 혼합기에서 60 mm 지점에 위치한다. PJ 토치의 feedstock은 질소이며, 유량은 15 SLPM이며, PJ토치에 사용된 전력은 2.49 ± 0.13 kW이다.

본 연구에 사용된 벤트 혼합기의 개념도는 Fig. 2와 같다. 두께 2 mm, 길이 6 mm의 플레이트 중심부에 폭 2 mm의 홈이 파여 있다. 이 홈을 “벤트 슬롯 (vent slot)”이라 정의하였다[3]. 연료는 혼합기 벽면 2 mm 지점에서 수직 분사된다. 분사구는 지름 1 mm인 홀이며, 질식 노즐로 분사 마하수는 1 이다.

Figure 3은 측정 장치를 나타낸다. 180 ns의 스트로보스코프를 사용하여 슬리렌 계측을 수행하였으며, 기계적 방식의 10 Hz의 스캐니벨브사 (PDCR23D-200psi: Scanivalve Inc)의 압력 센서를 사용하여 벽면 정압력을 측정하였다. 분사 압력은 스트레인지 형식의 Kyowa사의 정압력 센서 (PAB-A200KP: Kyowa Inc)를 사용하였다. 높이 방향의 가스 측정은 probe rake를 만들어 측정하였다. 각 probe의 내경은 1 mm이며, 전압튜브 타입이다. 바닥면에서 probe의 중심까지의 높이는 3 mm이며, probe 간의 간격은 4 mm이고 6개의 probe가 rake에 고정되어 있다. Probe

rake는 혼합기에서 59 mm 떨어진 곳에 위치하며, Probe rake의 area blockage ratio는 7% 이다. 풍동 작동 후 10 초 동안 연소기에서 가스를 흡입하며, 추출한 가스는 Varian CP-4900사의 Micro-GC 분석기를 사용하여 혼합가스를 분석한다. 질소 몰분량의 오차는 1%보다 낮으며, 산소, 수소, 헬륨 몰분량의 오차는 약 6% 정도이다.

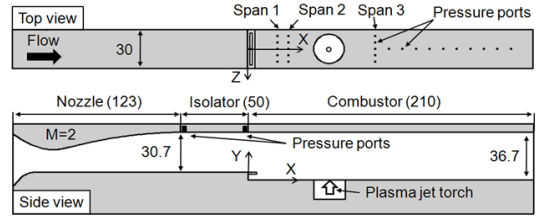


Fig. 1 Sketch of supersonic combustor model (unit: mm)

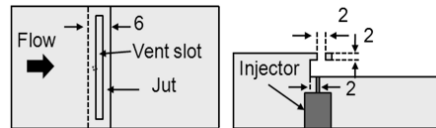


Fig. 2 Vent slot mixer (unit: mm)

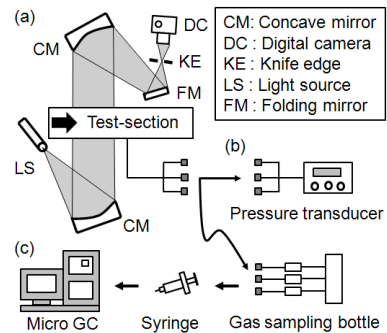


Fig. 3 Experimental measurement

3. 실험 결과 및 토론

3.1 헬륨을 사용한 혼합 실험

헬륨을 분사했을 경우의 유동장 구조를 Fig. 4에 나타내었다. 연료 분사가 없을 경우, 벤트 혼합기의 벤트에서 경사 충격파(shock #1)가 형성된다. 연료가 분사되면 벤트를 통해 침투한 연료에 의해

2차 충격파(shock #2)가 형성된다. 또한 연료 분사압이 높아짐에 따라 후류 혼합층은 두꺼워지며, 연료 분사가 없을 경우에 존재하던 전단층 주변의 약한 충격파들이 점점 사라지는 것을 볼 수 있다. Probe rake 앞의 probe에서는 초음속 유동장 내에 있을 경우 궁형 충격파가 형성되지만, 아음속 유동장 (혼합층) 내에 있을 경우 궁형 충격파가 형성되지 않는 것을 볼 수 있다. 이를 통해서 혼합층의 침투 높이를 가시적으로 추정할 수 있다.

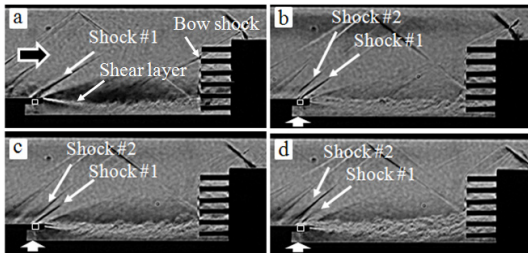


Fig. 4 Flowfield for the mixing experiment: a) no injection, b) $J = 3.09$, c) $J = 5.75$, and d) $J = 10.48$

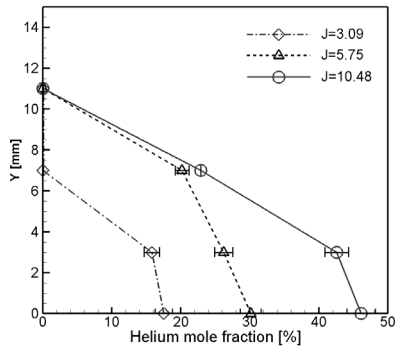


Fig. 5 Helium mole fraction along y axis

Probe rake에서 측정된 Y값에 따른 헬륨 잔류 농도를 Fig. 5에 나타내었다. 분사압이 높아짐에 따라 헬륨의 침투 높이가 증가한다. $Y = 7$ mm 지점에서는 $J = 5.75$ 일 경우 헬륨 농도는 20%로 증가하지만, 이후 분사압이 증가하여도 헬륨 농도의 증가량은 미미하다. 즉, 연료량 증가에도 불구하고 연료 침투한계가 있다. $Y = 3$ mm 이하 지점에서는 많은 양의 헬륨이 존재하며 분사압에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 벤트 슬롯을 통해 주 유동으로 침투되는 헬륨에 의해

$Y = 7$ mm 지점에서 헬륨이 측정은 되지만 많은 양이 분포하지는 못한다(see Figs. 4 and 5). 하지만 수직 분사된 헬륨은 벤트와의 충돌에 의해 후류 재순환 영역(또는 혼합층)에 많은 양(약 50%)이 잔존하게 된다.

3.2 수소를 사용한 연소 실험

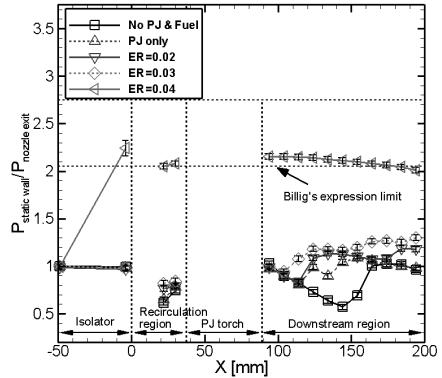


Fig. 6 Combustion pressure distribution

Figure 6은 벤트 혼합기의 당량비에 따른 연소 압력 분포를 나타낸다. PJ를 분사했을 경우, PJ에 의한 경계층 박리와 함께 후류 경계층의 두께는 증가하게 된다. 이로 인해 PJ와 연료 분사가 없는 경우에 비해 $X = 110$ mm 후류에서 압력 증가를 보인다. 재순환 영역 내에는 압력 변동이 없기 때문에, PJ 분사는 상류 유동에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 당량비 0.02의 경우, PJ의 압력 분포와 연소 압력 분포는 큰 차이를 보이지 않는다. 당량비 0.03의 경우, $X = 100$ mm 지점에서부터 압력 증가를 보이지만 낮은 연료량에 의해 높은 압력차를 보이지 않는다. 당량비 0.04의 경우, 연소기는 열질식이 일어났다. Isolator 설계에 사용된 Billig 식은 연소기에서 열질식이 일어날 경우의 배압을 기준으로 설계한 것이기 때문에, 이 압력비 ($P_2/P_1=2.05$)를 기준으로 연소기 내에서의 열질식 여부를 알 수 있게 된다. 열질식에 의한 연소기 배압 증가에 의해 Isolator영역의 압력도 증가하게 된다. Fig. 6에서는 노즐 출구부의 압력값은 일정하기 때문에, 연소기 배압에 의한 압력 영향은 isolator에 의해 노즐까지 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

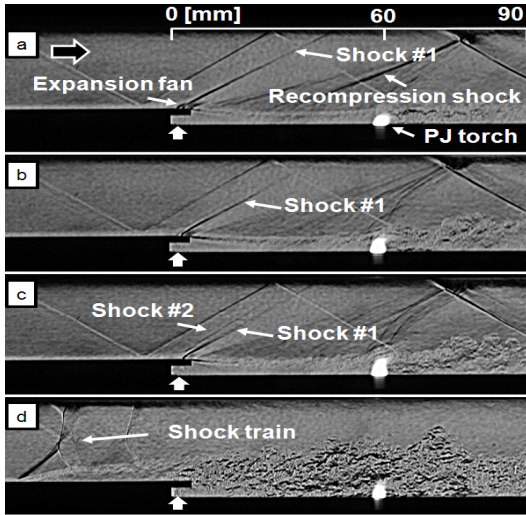


Fig. 7 Combustion mode transition: a) PJ only, b) ER = 0.02, c) ER = 0.03, and d) ER = 0.04

Figure 7은 당량비 증가에 따른 화염 유동장 차이를 나타내는 슐리렌 사진이다. PJ만 분사할 경우에는 PJ 앞전에서 궁형 충격파가 형성이 되며, 후류 경계층은 PJ에 의해 박리되어 출렁거리게 된다. 당량비 0.02의 경우, 후류 경계층 박리영역은 증가하게 되며, PJ의 불꽃이 Y축 방향으로 침투거리가 증가하게 된다. 당량비 0.03의 경우, 연료 분사량 증가에 의해 벤트 슬롯에서는 경사 충격파 shock #2가 생긴다. 슐리렌 사진 상에서는 당량비 0.02와 0.03의 유동의 차이는 크지 않기에 뚜렷한 차이점을 말하기 힘들며, 여전히 PJ에 의한 연소장은 상류 유동에 간섭을 일으키지 않는다. 단지 PJ의 불꽃이 당량비 0.02에 비해 침투 높이가 더 증가한 것을 볼 수 있다. 벤트 혼합기 후류 전단층에서 발달하는 재압축 충격파는 위 벽면과 충돌 후 후류로 전파된다. 이 때 아래 벽면과의 재충돌 지점은 대략 110 mm 일 것으로 판단된다. 이 지점은 Fig. 6에서 연소압력이 증가했던 영역이며, 재압축 충격파에 의한 “충격파 유도 연소”가 일어난 것으로 판단된다. 당량비 0.04의 경우, 연소기에서는 열질식이 발생한다. 열질식이 일어난 영역에서는 충격파 구조를 관찰할 수 없는 아음속 영역이다. 연소기 후면 배압에 의해 Isolator 내부에 경계층 박리와 함께 일련의 충격파가 형성된다.

이런 충격파 구조를 shock train이라 한다.

4. 결 론

마하 2의 초음속 풍동 장치에서 벤트 혼합기를 사용하여 혼합·연소실험을 수행하였다. 혼합실험에서는 벤트 혼합기에 의해 수직분사임에도 불구하고 후류 혼합층에 많은 연료가 잔존하였다. 연소 실험의 경우 낮은 온도의 초음속 유동에서 플라즈마 토치를 사용한 점화와 연소하지 않고 남은 연료-공기 혼합물의 충격파 유도 연소가 후류 영역에서 발생하였다. 열질식이 일어난 경우 shock train이 발생하며 이는 연소기내 연소 불안정성을 유도하였다.

후 기

본 연구는 서울대학교와 일본 동북대학교의 공동 연구 결과이며, 2009년도 2단계 BK 21사업과 국제과학기술협력재단/한이테리 협력기반조성사업의 지원으로 수행되었으며, 서울대학교 항공우주기술연구소와 항공우주연구원의 지원(차세대 극초음속 스크램제트 엔진 성능향상 및 최적화 연구과제)에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Hank, J. M., Murphy, J. S., and Mutzman, R. C., "The X-51A Scramjet Engine Flight Demonstration Program," AIAA-2008-2540.
2. 김채형, 성근민, 정인석, 최병일, Toshinori Kouchi, and Goro Masuya, "이차원 비대칭형 초음속 노즐 설계와 실험적 검증," 한국항공우주학회지, 제 37권, 9호, 2009, pp. 899-905.
3. 김채형, 정인석, "초음속 유동장 내 벤트 혼합기에 관한 수치해석 연구," 추진공학회지, 12권, 2호, 2008, pp. 33-39.